

Facteurs de variation et prévision de la production fourragère en zone de haute montagne

J.P. Roumet¹, Ph. Fleury¹, B. Jeannin²

Les techniques de conduite et d'amélioration des prairies que l'on préconise de façon générale (en particulier la fauche précoce) sont-elles utilisables en Haute-Maurienne, région de haute montagne au climat froid et sec ?

RÉSUMÉ

La Haute-Maurienne appartient au domaine interne des Alpes du Nord. Par comparaison avec un secteur moins froid et plus arrosé des Alpes, les conditions de milieu des vallées de Haute-Maurienne entraînent, à fertilisation égale, des modifications morphologiques des plantes (réduction de la proportion de tiges) qui ont des conséquences favorables sur leur valeur nutritive. Les facteurs défavorables à la croissance (faibles disponibilités en nutriments et en eau, température basse) ont un effet favorable sur la digestibilité et la teneur en azote, alors que les stress climatiques (neige, fortes chaleurs) ont un effet défavorable. Ces variables ont des modes d'action complexes qui se traduisent, dans les Alpes internes, par une forte variabilité interannuelle de production de matière sèche et de valeur nutritive. Malgré le nombre de facteurs en jeu et l'existence de mécanismes encore mal explicités, des indicateurs simples, permettant un diagnostic de terrain rapide, peuvent être proposés.

MOTS CLÉS

Alpes, diagnostic, digestibilité, modélisation, montagne, prairie de montagne, production fourragère, structure de la végétation, valeur azotée, variations annuelles.

KEY-WORDS

Alps, annual variations, diagnosis, digestibility, forage production, highland, mountain pasture, nitrogen value, setting-up of models, sward structure.

AUTEURS

1 : S.U.A.C.I. Montagne/G.I.S. Alpes du Nord, 11 rue Métropole, F-73000 Chambéry.

2 : I.N.R.A. - S.A.D., route de Saint-Cyr, F-78026 Versailles cedex.

La question de l'utilisation en Haute-Maurienne des techniques de conduite et d'amélioration des prairies généralement préconisées nous a été posée par la profession agricole. En effet, dans le même département, en Savoie, mais plus bas en altitude, certains agriculteurs s'orientent vers **une intensification de leurs prairies de fauche** afin d'améliorer la qualité de leur foin : fauche précoce du 1^{er} cycle, augmentation du nombre de coupes et de la fertilisation. Ces pratiques supposent une organisation (concilier interventions sur les prairies et conduite des troupeaux en alpage par exemple) et un équipement (chaîne de récolte, séchage en grange, etc.) qui ne sont possibles que dans certaines exploitations de Haute-Maurienne. Mais, même pour celles-ci, **les conditions climatiques beaucoup plus rigoureuses qu'en plaine permettent-elles l'adoption de ce mode de conduite ?** D'autre part, des enquêtes sur les pratiques agricoles et les objectifs d'utilisation des prairies dans les exploitations agricoles de Haute-Maurienne (ROUMET et FLEURY, 1994) nous ont montré que la constitution d'un stock fourrager important pour l'hiver est souvent prioritaire. La quantité récoltée prime sur la qualité.

Pour répondre à cette question initiale, tout en ayant le souci de proposer des améliorations techniques adaptées à ces différents objectifs et contraintes d'utilisation des prairies de fauche, nous avons étudié leur fonctionnement agronomique. Nous avons travaillé dans deux directions complémentaires :

- Afin de mettre en évidence les spécificités de la Haute-Maurienne, nous avons réalisé une analyse comparée du comportement agronomique de la végétation entre ce secteur d'une part et les Alpes du Nord externes d'autre part. Il s'agit d'une zone plus basse en altitude et plus arrosée où nous disposons de nombreuses références fourragères (JEANNIN et al., 1991 ; FLEURY, 1994).

- Nous avons également étudié les facteurs de variation de la production de matière sèche et de la valeur nutritive des prairies de Haute-Maurienne en vue de parvenir à prédire l'effet des pratiques en interaction avec les conditions de milieu physique.

Enfin, après avoir présenté ces résultats, nous discutons leurs conséquences en matière de diagnostic et de prévision de la production et de la valeur nutritive des prairies de Haute-Maurienne.

Matériel et méthodes

1. Présentation régionale

Située dans le département de la Savoie, la Haute-Maurienne appartient au domaine interne des Alpes du Nord. Les différentes vallées internes des Alpes du Nord françaises sont l'Oisans, la Haute-Tarentaise, la Haute-Maurienne et le Haut-Briançonnais (RICHARD et TONNEL, 1987). La forme coudée de ces vallées et leur position à l'intérieur du massif alpin limitent la pénétration des perturbations météorologiques (OZENDA, 1985). Ces vallées se différencient de la zone externe des Alpes, plus à l'ouest, par une altitude moyenne élevée qui détermine **un climat froid** (température moyenne annuelle de l'ordre de 6°C à 1 400 m d'altitude) et par **une période de sécheresse estivale** (800 à 1 000 mm de précipitations annuelles

Période	Température (°C)		Pluviométrie (mm)		Jours de neige au sol	Jours de gel	Jours chauds (T max >20°C)
	1/05-30/06	1/07-31/08	1/05-30/06	1/07-31/08	1/05-30/06	1/05-30/06	1/05-30/06
Moyenne des années de suivi fourrager							
Termignon	11,2	15,8	85	78	1,7	4,3	21
Bessans	8,7	13,8	94	72	7	17	11
Arêches	11,9	16,5	250	207	1,7	2,3	18
Termignon : valeurs annuelles							
1984	9,3	14,9	113	65	5	8	18
1989	12,1	16,0	53	118	0	3	28
1990	12,2	16,4	89	50	0	2	16
1991	10,1	17,6	82	52	4	9	22

TABLEAU 1 : Caractéristiques climatiques des années de mesure en Haute-Maurienne (Termignon, 1 300 m d'altitude, et Bessans, 1 700 m) et dans les Alpes externes (Arêches, 1 030 m).
TABLE 1 : Climatic characteristics of the years of measurement in Haute-Maurienne (Termignon, altitude 1 300 m, and Bessans, 1 700 m) and in the outer Alps (Arêches, 1 030 m).

et seulement 200 mm durant les 3 mois d'été ; tableau 1 ; les périodes du 1^{er} mai au 30 juin et du 1^{er} juillet au 31 août permettent de caractériser les conditions durant les 1^{er} et 2^e cycles).

Ces conditions climatiques imposent une courte période de végétation ainsi que de fortes amplitudes thermiques quotidiennes et des aléas climatiques (neige et gel) sur la végétation en pleine croissance. Début juin, par exemple, on observe fréquemment, à 1 500 m d'altitude, des gels d'épis de dactyle dans leur gaine. Les sols sont en général de texture sableuse ou limono-sableuse. Souvent peu profonds, ils ont une faible réserve hydrique (DAMBRINE et al., 1984).

2. Analyse comparée du comportement agronomique de la végétation dans 2 secteurs des Alpes

■ Analyse à l'échelle de la prairie, toutes espèces confondues

La production de matière sèche et la valeur nutritive de la végétation ont été étudiées pour trois prairies : deux sont en Haute-Maurienne (Alpes internes) et une est dans les Alpes externes, zone à forte pluviométrie (1 500 - 1 700 mm de précipitations annuelles). Les pratiques agricoles et la végétation de ces prairies sont présentées dans le tableau 2. La végétation, les conditions de nutrition et la réserve utile du sol de la "prairie riche" des Alpes internes sont très proches de la prairie de comparaison des Alpes externes ("prairie riche", Alpes externes). Dans les Alpes internes, une troisième parcelle moyennement fertilisée et plus sèche ("prairie moyenne") complète ce dispositif.

Le protocole de mesure permet de disposer de la courbe de croissance du 1^{er} cycle et de mesurer les repousses de 2^e cycle, ainsi que les productions totales annuelles. Dans les vallées internes, le 3^e cycle, dont la production a toujours été inférieure à 300 kg/ha de matière sèche (MS), n'a pas été considéré. Durant le 1^{er} cycle, les prélèvements de fourrages ont lieu toutes les semaines (soit un total de 7 à 9 prélèvements) sur des placettes voisines. Chaque prélèvement est constitué de 3 ou 6 répétitions, selon les stades, d'une surface élémentaire de 0,5 m² coupée à 5 cm de haut. Les repousses prélevées, après coupe

	Prairie riche des Alpes externes	Prairie riche des Alpes internes	Prairie moyenne des Alpes internes
Station météorologique correspondante	Arèches	Termignon	Bessans
Altitude (m)	900	1 400	1 650
Réserve utile du sol (mm) *	120	100	70
Fertilisation			
- organique (fumier, t/ha/an)	40	35	25
- minérale (unités N-P-K/ha/an)	0	0-0-80	0
Indice de nutrition azotée**	0,90	0,88	0,77
Stade habituel de fauche (stade du dactyle)	Pleine épiaison	Début floraison	Début dissémination
Abondance des dicotylédones non légumineuses (%)	25	30	50
Espèces dominantes	dactyle, pâturin commun, pissenlit	dactyle, chiendent rampant, triseté jaunâtre, pissenlit	dactyle, triseté jaunâtre, sauge des prés, saletés des prés, anthriscus sauvage, géranium des bois

* Réserve utile du sol calculée à partir de la profondeur d'enracinement, du taux de cailloux, de la texture des différents horizons et de la position topographique selon une méthode proposée par DORIOZ et TREVISAN (1992).

** Indice de nutrition azotée calculé selon la formule proposée par DURU (1992b). La valeur indiquée est une moyenne obtenue sur toutes les années de suivi, à partir de l'ensemble des prélèvements effectués avant l'épiaison du dactyle et de production d'au moins 1 t MS/ha. Cette valeur caractérise donc de façon relative la nutrition azotée de ces 3 prairies.

du 1^{er} cycle aux stades mi-montaison, pleine épiaison et début fructification du dactyle sont âgées de 6, 8 et 12 semaines. Lors de chaque prélèvement, le stade phénologique, la hauteur et le port des principales espèces sont observés.

Sur chaque prélèvement ont été dosés, après séchage en étuve et pesée, la teneur en azote Kjeldhal (N, en g/kg MS) et la digestibilité à la pepsine-cellulase pour estimation de la digestibilité de la matière organique (DMO, en % ; AUFRÈRE, 1982).

■ Morphologie et valeur nutritive à l'échelle de l'espèce : cas du dactyle et du géranium des bois

Afin de mieux comprendre les différences de comportement des plantes entre Alpes externes et internes, nous avons étudié les différences de composition morphologique (taux de tiges, etc.) et de valeur nutritive à l'échelle de l'espèce. Nous avons retenu 2 espèces fréquentes : le dactyle (*Dactylis glomerata*) et le géranium des bois (*Geranium sylvaticum*). Pour cela, nous avons choisi, dans les 2 secteurs, 3 stations voisines et différant seulement par la fertilisation organique appliquée depuis au moins 10 ans : aucune fertilisation, 20 t/ha/an et 40 t/ha/an. Le géranium des bois n'a pas été observé avec une fertilisation moyenne. L'altitude des stations est de 900 m pour les Alpes externes et de 1 500 m pour les Alpes internes. Le rythme d'utilisation de ces stations est peu intensif : fauche après la floraison du dactyle, regain et/ou pâture.

Durant le 1^{er} cycle, un prélèvement hebdomadaire est effectué avec tri de l'ensemble de la biomasse de chaque espèce (coupe à 2 cm). Le taux de tiges est compté avec notation du stade phénologique, de la hauteur des tiges, des talles herbacées pour le dactyle et des feuilles radicales pour le géranium des bois. Après séchage en étuve, l'azote Kjeldhal et la digestibilité à la pepsine-cellulase pour estimation de la digestibilité de la matière organique sont dosés sur les plantes entières.

TABLEAU 2 : Pratiques agricoles et végétation des prairies de fauche étudiées.

TABLE 2 : Agricultural practices and swards of the hay-meadows studied.

3. Etude des facteurs de variation de la production et de la valeur nutritive des prairies dans les Alpes internes

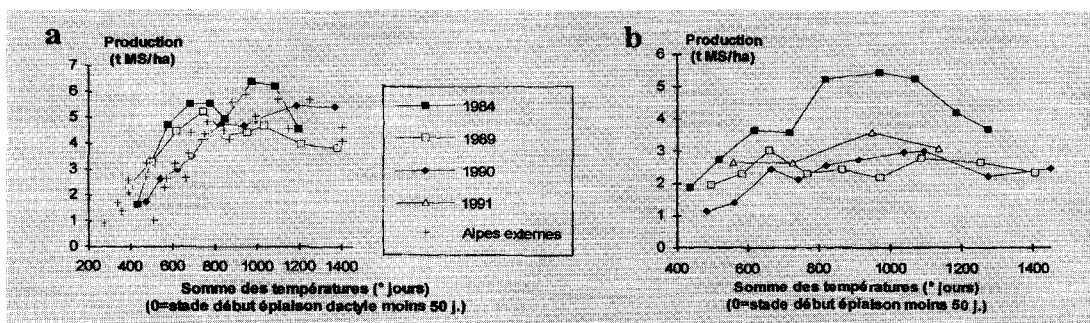
Un réseau de 10 parcelles subissant des pratiques agricoles stables depuis plus de 5 ans a été observé durant 4 ans (1984, 1989, 1990 et 1991). Cet **échantillon est représentatif de la diversité des conditions de milieu physique et de pratiques agricoles de la région**. Les critères d'échantillonnage sont le niveau de fertilisation organique (0 à 50 t/ha/an), le stade habituel de fauche (de pleine épiaison à fin fructification du dactyle), le régime hydrique de la station (réserve utile de 40 à 170 mm) et la situation topographique (altitude de 1 350 à 1 750 m et exposition du nord au sud).

Le dispositif de mesure est le même que celui utilisé dans les 3 parcelles ayant servi à la comparaison entre Alpes externes et internes.

Une analyse de variance a permis d'identifier les principaux facteurs de variation de la production de matière sèche (MS), de la DMO et de la teneur en N. Pour la DMO et la teneur en N, ces premiers résultats ont été quantifiés à l'aide de régressions multiples avec contrôle de la hiérarchie des facteurs (TOMASSONE et al., 1983). Différentes variables explicatives ont été utilisées. L'avancée du 1^{er} cycle a été exprimée en nombre de jours ou en somme de températures (températures quotidiennes supérieures à 0°C) depuis le stade début épiaison du dactyle moins 50 jours. Ce moment est une bonne approximation du début de la croissance de la végétation en montagne (FLEURY, 1994). En effet, compte tenu des différences de précocité de la végétation liées aux forts contrastes topographiques, en particulier d'altitude, il est impossible de retenir une date commune à toutes les parcelles. La production de matière sèche, qui intègre à la fois l'avancée de la saison et les différences de croissance selon la disponibilité en eau, en nutriments et en température a aussi été testée (LEMAIRE et ALLIRAND, 1993). Des variables susceptibles d'avoir un effet sur la valeur nutritive ont également été employées : stress climatiques (gels, neige, fortes chaleurs ; DEINUM, 1984 ; LEMAIRE et al., 1989a) et états de végétation (abondance des graminées, composition morphologique, etc. ; DURU, 1989 ; TROXLER, 1989 ; FLEURY, 1994).

FIGURE 1 : Evolution, durant le 1^{er} cycle, de la production de matière sèche a) de la prairie "riche" de Haute-Maurienne (Alpes internes) et comparaison avec la prairie "riche" des Alpes externes, b) de la prairie "moyenne" de Haute-Maurienne.

FIGURE 1 : Evolution, during first growth cycle, of the dry matter production a) of the "rich" pasture in Haute-Maurienne (inner Alps), compared with that of the "rich" pasture in the outer Alps, b) of the "medium" pasture in Haute-Maurienne.



Résultats et discussion

1. Au 1^{er} cycle, des productions comparables mais une valeur nutritive supérieure des fourrages des Alpes internes

Durant le 1^{er} cycle, la production de matière sèche de la "prairie riche" des Alpes internes se situe dans les mêmes bornes que celle de la "prairie riche" des Alpes externes (figure 1a). Dans des conditions de nutrition favorables, les différences climatiques entre ces secteurs ne se traduisent donc pas, à sommes de températures égales, par des différences dans la production du 1^{er} cycle.

Les courbes d'évolution de la DMO et de la teneur en N des 3 parcelles sont présentées dans la figure 2. La DMO et les teneurs en N de la prairie "riche" des Alpes externes est tout au long du 1^{er} cycle plus faible que celles de la prairie "riche" des Alpes internes.

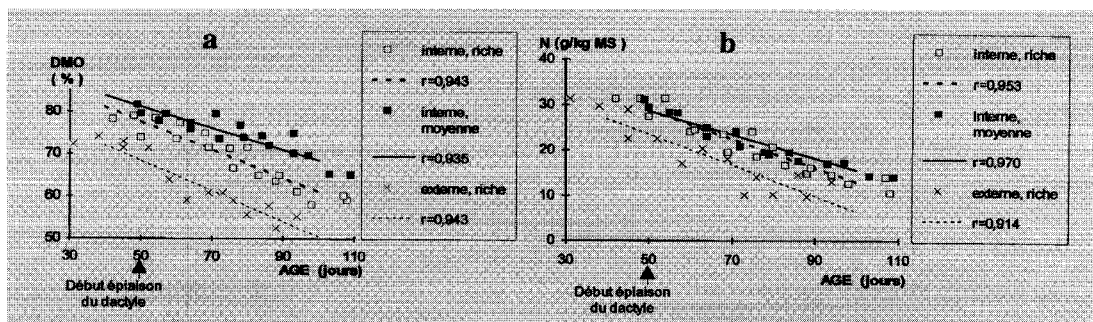
Les résultats obtenus sur le dactyle (tableau 3) et le géranium des bois (tableau 4) permettent de formuler des hypothèses explicatives. Dans les vallées internes, du fait des conditions plus froides et plus sèches, le dactyle et le géranium des bois se trouvent en situation de stress plus marqué et réagissent, à fertilisation égale, par une réduction de la taille et de la proportion de tiges. Par exemple, à la floraison du dactyle, dans la parcelle de fertilisation élevée, les talles reproductrices du dactyle ne représentent que 68% de la matière sèche dans les Alpes internes contre 90% dans les Alpes externes.

Pour le dactyle et le géranium des bois, les conditions de croissance, qu'elles relèvent de la disponibilité en nutriments, en eau ou en température, ont donc une influence sur leur composition morphologique : les conditions difficiles sont favorables à une faible proportion de tiges. Ceci a des conséquences importantes sur la DMO, mais aussi sur la teneur en azote. **A stade et fertilisation égaux, dactyle et géranium ont une DMO et une teneur en N supérieures dans les Alpes internes.**

Les différences de valeur nutritive entre Alpes externes et internes peuvent donc être interprétées, au moins partiellement, comme **un effet indirect du climat sur la composition morpholo-**

FIGURE 2 : Evolution, au 1^{er} cycle, a) de la digestibilité de la matière organique (DMO) et b) de la teneur en azote de 2 prairies de Haute-Maurienne (Alpes internes ; valeurs 1989 et 1990) et de la prairie riche des Alpes externes (valeurs de 3 années de mesure).

FIGURE 2 : Evolution, during first growth cycle, a) of organic matter digestibility (OMD) and b) of N concentration in 2 pastures of Haute-Maurienne (inner Alps ; 1989 and 1990 values) and in the rich pasture of the outer Alps (3 years of measurements).



Fertilisation des stations	Nulle		Moyenne		Elevée	
	Externe	Interne	Externe	Interne	Externe	Interne
Secteur alpin						
Longueur des tiges (cm)	63	68	83	73	104	93
Talles à tiges / talles totales (% MS)	67	21	83	25	90	68
DMO plante entière* (%)	64,0	71,9	60,2	68,7	58,6	64,3
Teneur en N plante entière* (g/kg MS)	13,5	18,1	11,1	17,2	12,3	15,4

*Il s'agit de valeurs ajustées pour chaque combinaison de fertilisation et de secteur bioclimatique en fonction de l'âge J du dactyle (âge J en jours depuis le stade début épiaison du dactyle moins 50). Les modèles sont de la forme : DMO ou N = aJ + b ou Y = aJ + cJ² + b (seuil d'introduction des variables : 5% au test de F). Les coefficients de corrélation (R) compris entre 0,860 et 0,974 pour la DMO et entre 0,888 et 0,977 pour les teneurs en N sont tous satisfaisants. Le nombre d'observations varie de 8 à 31.

TABLEAU 3 : Morphologie et valeur nutritive du dactyle suivant la fertilisation et le secteur bioclimatique (valeurs moyennes à la floraison du dactyle).

TABLE 3 : *Morphology and nutritional value of cocksfoot according to fertilization and to bioclimatic region (mean values at anthesis of cocksfoot).*

gique. Ceci n'exclut pas une action directe du climat sur la nutrition azotée (LEMAIRE et al., 1989b) et sur la composition des organes (teneur en lignine des limbes ou digestibilité des parois cellulaires, etc. ; SNAYDON, 1972 ; DEINUM, 1984). Nous avons ainsi montré qu'il existe une différence significative de 5,3% de DMO au seuil 1% du test de F, au profit des vallées internes, entre les talles herbacées des dactyles des 2 secteurs (FLEURY, 1994).

2. Forte variabilité interannuelle de la production et de la valeur nutritive dans les Alpes internes

TABLEAU 4 : Morphologie et valeur nutritive du géranium des bois suivant la fertilisation et le secteur bioclimatique (valeurs moyennes à la floraison du dactyle ; à ce stade, le géranium est au stade fructification).

TABLE 4 : *Morphology and nutritional value of wood cranesbil (Geranium sylvaticum) according to fertilization and to bioclimatic region (mean values at anthesis of cocksfoot ; at that stage, cranesbill is fruiting).*

La sécheresse estivale qui touche de façon assez systématique la Haute-Maurienne ne permet pas des repousses de second cycle importantes, même si la fauche du 1^{er} cycle est précoce (tableau 5). La production annuelle récoltable des prairies de cette zone est donc exclusivement celle du 1^{er} cycle. Seules quelques parcelles très fraîches, exposées au nord et très fertilisées, ont un regain fauchable certaines années (de l'ordre de 1,5 t MS/ha).

Pour le 1^{er} cycle, les variations interannuelles de production en Haute-Maurienne permettent d'évaluer les effets du climat sur la croissance (figures 1a et 1b). Pour les 2 prairies, la production est plus forte en 1984 qu'en 1989 et 1990, années plus sèches. C'est **la parcelle de fertilisation moyenne et de régime hydrique plus sec** ("prairie moyenne") qui est la plus sensible aux conditions du printemps. La réduction de production en 1989 ou en 1990 s'y élève, pour le 1^{er} cycle, à plus de 3 t MS/ha par rapport à 1984. En 1989 et 1990, du fait des

Fertilisation des stations	Nulle		Elevée	
	Externe	Interne	Externe	Interne
Secteur alpin				
Longueur des tiges (cm)	56	40	69	61
Brins à tiges / brins totaux (% effectif)	7	7	29	15
DMO plante entière* (%)	74,4	79,9	71,1	74,9
Teneur en N plante entière* (g/kg MS)	17,6	21,1	15,6	17,8

*Il s'agit de valeurs ajustées pour chaque combinaison de fertilisation et de secteur bioclimatique en fonction de l'âge J du dactyle (âge J en jours depuis le stade début épiaison du dactyle moins 50). Les modèles sont de la forme : DMO ou N = aJ + b ou Y = aJ + cJ² + b (seuil d'introduction des variables : 5% au test de F). Les coefficients de corrélation (R), compris entre 0,857 et 0,935 pour la DMO et entre 0,902 et 0,974 pour les teneurs en N, sont tous satisfaisants. Le nombre d'observations varie de 8 à 11.

Production*	Prairie riche des Alpes externes		Prairie riche des Alpes internes		Prairie moyenne des Alpes internes	
	annuelle	regain	annuelle	regain	annuelle	regain
Stade du dactyle à la fauche du 1^{er} cycle :						
- épi à 10 cm	5,4 - 8,8	1,5 - 3,5	3 - 4,9	1,2 - 1,7	1,9 - 3,2	0 - 1,8
- épilaison	5,9 - 8,6	1,5 - 3,2	3,6 - 6,1	0,6 - 0,8	3 - 4,6	0 - 0,9
- fructification	6,2 - 9,0	0,9 - 3	4,7 - 6,7	0 - 0,5	2,8 - 6,1	0 - 0,6

* Dans les Alpes externes, la production annuelle est le total de 3 cycles. Dans les Alpes internes, le 3^e cycle, toujours inférieur à 300 kg MS/ha, n'a pas été comptabilisé.

faibles précipitations, il n'y a pratiquement plus de croissance à partir du stade pleine épilaison du dactyle (environ 700 degrés.jours) alors qu'en 1984 la croissance s'est poursuivie jusqu'à 1 000 degrés.jours, c'est à dire jusqu'à la fructification du dactyle. La parcelle "riche" mais aussi de régime hydrique plus favorable a des écarts interannuels de production plus réduits, ne dépassant pas 2 t MS/ha. Sur l'ensemble des 10 parcelles observées, les écarts de production entre année sèche et année arrosée sont de 20% lorsque la réserve utile du sol est supérieure à 100 mm mais peuvent atteindre 60% pour une réserve utile inférieure à 50 mm.

Plus encore que la production de matière sèche, **la valeur nutritive des fourrages des Alpes internes subit de fortes variations interannuelles**. Une analyse de variance effectuée sur l'échantillon de 10 parcelles, montre, au 1^{er} cycle, outre un effet prépondérant de l'âge, un poids très important de l'année par rapport à la parcelle, surtout pour la DMO (tableau 6).

Les valeurs de DMO (Digestibilité de la Matière Organique) de la prairie "moyenne" illustrent cette variabilité interannuelle (figure 3). Les DMO sont plus élevées en 1989 et en 1990, années peu productives avec un printemps sec mais aussi avec peu d'accidents climatiques (neige, gel sur la végétation en croissance). 1984 et plus encore 1991 ont des DMO plus basses. 1984 est une année productive et tardive : les mois de mai et juin ont été pluvieux et froids, retardant le démarrage de la croissance de plus d'un mois. Pour cette raison, la neige et les températures négatives de 1984 ont peu touché la végétation encore très rase. L'année 1991, sèche et peu productive, est plus précoce. En mai et en juin, la neige et le froid au moment de la montaison et de l'épilaison du dactyle ont provoqué la verse et le gel de l'herbe. Enfin, fin juin, de fortes chaleurs ont entraîné un flétrissement de la végétation.

	Production MS	DMO	N
Variation totale	473	15 411	12 531
Variation expliquée	362*	12 245*	10 494*
soit en %	76,6	79,5	83,7
Facteur : - âge du 1 ^{er} cycle	106*	11 016*	9 727*
- parcelle	210*	476*	540*
- année	46*	753*	227*

* Valeurs significatives au seuil 1/10 000 du test de F

TABLEAU 5 : Pour les 3 prairies observées, production annuelle et production de regain suivant le stade de fauche du 1^{er} cycle (regain de 8 semaines ; valeurs extrêmes pour les différentes années de suivi).

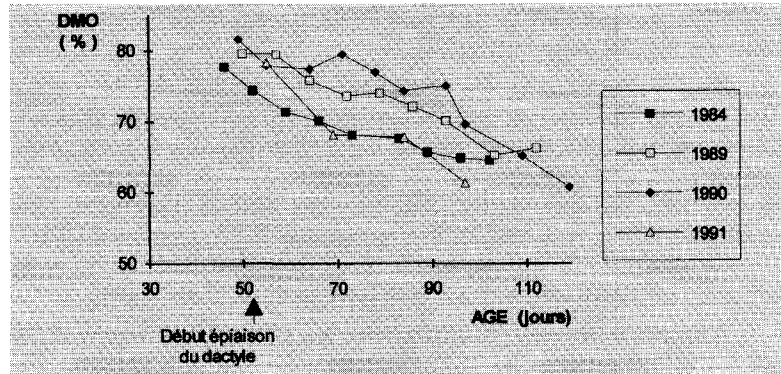
TABLE 5 : Annual forage yields and aftermath yields of the 3 pastures studied, according to cutting date in the first growth cycle (8 weeks aftermath ; extreme values in the various years of observation).

TABLEAU 6 : Analyse de l'effet de l'âge, de la parcelle et de l'année sur la production, la DMO et la teneur en N du 1^{er} cycle : sommes des carrés d'écarts dans l'analyse de variance effectuée sur un échantillon de 10 parcelles suivies durant 4 ans dans les Alpes internes.

TABLE 6 : Analysis of the effects of age, plots, and years on yield, OMD, and N concentration in the first growth cycle : sums of squares of differences in ANOVA carried out on a sample of 10 plots studied for 4 years in the inner Alps.

FIGURE 3 : Variabilité interannuelle de l'évolution au 1^{er} cycle de la digestibilité de la matière organique (DMO) de la prairie "moyenne" de Haute-Maurienne (Alpes internes).

FIGURE 3 : Variability among years of the evolution during the first growth cycle of organic matter digestibility (OMD) in the "medium" pasture of Haute-Maurienne (inner Alps).



3. Facteurs de variation de la production et de la valeur nutritive dans les Alpes internes

Des régressions multiples effectuées pour expliquer les variations de DMO (tableau 7) et de teneur en N (tableau 8) ont mis en évidence les aspects suivants. **L'âge de la pousse, exprimé en jours ou en somme de températures, est le premier facteur de variation de la valeur nutritive.** L'âge rend compte de phénomènes complexes : lignification croissante des tissus, dynamique de croissance et de sénescence des organes, dilution croissante de l'azote.

La production de matière sèche est une variable significative du modèle concernant la DMO : à âge égal, une production élevée a un effet négatif sur la DMO. Nous montrons ainsi que **les conditions favorables à la croissance sont défavorables à la DMO.** Cependant, la production considérée sans l'âge n'explique pas une part importante des variations de DMO : le coefficient de corrélation entre âge en jours et DMO est de 0,812 alors qu'il n'est que de 0,406 entre DMO et production. Dans les végétations complexes des Alpes internes, à la différence de résultats obtenus pour la luzerne (LEMAIRE et ALLIRAND, 1993), la variable production de matière sèche ne permet donc pas de traduire, par une relation unique, l'influence sur la DMO de l'âge et des

TABLEAU 7 : Hiérarchie des facteurs influant sur la DMO du 1^{er} cycle, obtenue à partir d'une régression multiple (n=264, R²=0,836 ; toutes les variables sont significatives au seuil 1% du test de F).

TABLE 7 : Hierarchy of factors influencing OMD in the first growth cycle, obtained from a multiple regression (n=264, R²=0,836 ; all factors significant at 1% probability level of the F-test).

Facteur de variation	Coefficient multiplicateur	Effet sur la DMO et observations de terrain sur la végétation
1 - Age (en jours depuis le début épiaison (DE) du dactyle moins 50 j.)	-0,205	- "Age" est la variable essentielle - Résultats comparables en jours et en degrés jours
2 - Neige (nombre de jours de neige au sol de DE - 20 j à DE + 15 j)	-0,963	- Effet négatif - Verse de la végétation, mortalité de feuilles
3 - Production (t MS/ha)	-0,541	- Effet négatif à stade phénologique égal - A stade égal, taux de tiges et mortalité des feuilles inférieures sont plus élevés dans les prairies à forte production
4 - Températures fortes (somme des températures maximales supérieures à 20°C dans les 15 jours précédant la coupe)	-0,0500	- Effet négatif - Flétrissement et mortalité de feuilles surtout chez les dicotylédones (géranium des bols, renoncule âcre, saisisifs des prés, renouée bistorte, etc.)
5 - Taux de graminées (Age x % du volume de graminées dans la végétation)	-0,00168	- Effet négatif, surtout en fin de cycle - Les graminées sont souvent moins riches en feuilles que les dicotylédones
6 - Taux d'organes végétatifs (Age x % du volume de tiges herbacées et de feuilles radicales dans la végétation)	0,00118	- Effet positif, surtout en fin de cycle - Ce taux est plus élevé dans les prairies peu productives
Constante	92,0	

variations de conditions de croissance selon la disponibilité en eau, en nutriments et en température.

Pour l'azote, dans les conditions de nutrition et de régime hydrique très variables de notre échantillon, il n'existe **pas de relation directe entre production et teneur**. Deux effets opposés et produisant donc des résultats d'interprétation complexe sont en jeu : une plus faible dilution de l'azote dans la matière sèche lorsque la sécheresse ou le déficit en nutriments réduisent la croissance, mais aussi une influence de la disponibilité en eau et en nutriments sur l'absorption et le niveau de nutrition azotée des végétations (LEMAIRE et al, 1989b).

D'autres variables qui traduisent les stress climatiques ainsi que les effets propres de la végétation précisent le diagnostic. Un nombre important de jours de neige au printemps, des températures maximum supérieures à 20°C dans les 15 jours précédant la coupe entraînent une baisse de DMO. Cet impact négatif des températures mais aussi de fortes précipitations sur la digestibilité et la lignification des tissus a aussi été montré en milieu contrôlé (DEINUM, 1984). Pour les teneurs en N, seules les fortes températures ont un effet dépressif. D'autre part, une forte abondance des graminées, une faible proportion d'organes végétatifs, variable liée négativement à la production, accélèrent la chute de la DMO et de la teneur en N avec l'âge. Nous retrouvons, à l'échelle de la prairie, toutes espèces confondues, les résultats obtenus pour le dactyle et le géranium des bois : influence négative de la proportion de tiges pour les 2 espèces et valeur nutritive du géranium supérieure à celle du dactyle (tableaux 3 et 4).

4. Conséquences pour le diagnostic

Ces résultats illustrent la complexité et les particularités du fonctionnement des prairies en haute montagne. Ils montrent aussi les limites des outils habituels de prévision et de diagnostic.

Au 1^{er} cycle, par exemple, **les sommes de températures classiquement utilisées pour prédire la production de matière sèche** (GOSSE et al., 1984 ; LEMAIRE, 1991) **ne peuvent pas être employées**. En effet, même si cette méthode mise au point pour la prévision de la production potentielle peut aujourd'hui être adaptée, sur la base des indices de nutrition (DURU, 1992a), aux situations de nutrition limitantes que nous avons étudiées, d'autres facteurs restreignent son utilisation dans les Alpes internes. D'une part, certaines années un déficit hydrique apparaît tôt en saison et sa prise en compte est actuellement très difficile. D'autre part, la variabilité topographique de ces hautes vallées et des différences climatiques importantes entre années doivent affecter la liaison entre température et rayonnement : de 1 300 à 1 700 m, les tem-

TABLEAU 8 : Hiérarchie des facteurs influant sur la teneur en azote du 1^{er} cycle, obtenue à partir d'une régression multiple (n=264, R²=0,835 ; toutes les variables sont significatives au seuil 1% du test de F ; elles sont définies au tableau 7).

TABLE 8 : *Hierarchy of factors influencing N concentration in the first growth cycle, obtained from a multiple regression (n=264, R²=0.835 ; all factors significant at 1% probability level of the F-test ; factors defined in Table 7).*

Facteur de variation	Coefficient multiplicateur	Effet sur la teneur en azote
1 - Age	-0,672	Age est la variable essentielle ; baisse rapide, puis ralentissement en fin de cycle
2 - (Age) ²	-0,290	
3 - Températures fortes	-0,0441	Effet négatif
4 - Taux d'organes végétatifs	0,000 703	Effet positif, surtout en fin de cycle
5 - Taux de graminées	-0,000 798	Effet négatif, surtout en fin de cycle
Constante	55,5	

pératures baissent et le rayonnement augmente par exemple. Or, c'est le rayonnement intercepté et non la température qui est à une valeur explicative de portée générale de la production primaire (GOSSE et al., 1984 ; LEMAIRE, 1985). Malheureusement, la mesure du rayonnement est plus rare et plus coûteuse que celle de la température et seuls quelques enregistrements ponctuels existent. L'utilisation ultérieure de cette variable pour le diagnostic serait donc impossible.

Pour la valeur nutritive, la complexité est également forte. Elle limite les possibilités d'utilisation de modèles à variable unique reliant la valeur nutritive au stade phénologique (ANDRIEU et al., 1988) ou à la production (LEMAIRE et ALLIRAND, 1993). Nous avons, par exemple, décrit les effets sur la valeur nutritive de certains aléas climatiques fréquents en haute montagne mais peu prévisibles : neige, coups de chaleur. De plus, les mécanismes en cause sont complexes, peu expliqués, et d'autres facteurs aujourd'hui encore inconnus sont susceptibles d'avoir une grande importance dans ces conditions extrêmes de pousse de l'herbe.

Dans l'état actuel des connaissances, il est donc impossible de proposer des modèles de prévision de la production et de la valeur nutritive des fourrages ayant à la fois une valeur déterministe et un intérêt pour le diagnostic : d'une part, les processus et les facteurs en action sont imparfaitement connus, d'autre part les références climatiques sont peu nombreuses et difficiles à extrapoler d'un site à un autre compte tenu de la diversité topographique. Dans ce contexte, **avec un objectif de diagnostic rapide, nous avons proposé aux techniciens du développement et aux agriculteurs des indicateurs de terrain simples mais multiples** de façon à prendre en compte les nombreux facteurs en jeu :

- Le type de végétation intègre globalement les facteurs influant sur la production et la valeur nutritive qui relèvent à la fois des conditions de milieu et des pratiques (régime hydrique, fertilisation) et des états de végétation (proportion de graminées, d'organes végétatifs, etc.). Sur le terrain, l'identification du type de prairie se fait à l'aide d'une clef de reconnaissance établie sur des critères qui s'estiment rapidement et qui ont été retenus pour leur valeur indicatrice des facteurs explicatifs de la production et de la valeur nutritive (proportion de dicotylédones, physiologie des graminées et nom de quelques dicotylédones).

- Le stade phénologique du dactyle traduit l'avancée de la saison de végétation durant le 1^{er} cycle. C'est un indicateur d'état instantané qui permet de prévoir la production et la valeur nutritive de chaque type de prairie en "année climatique moyenne".

- Une caractérisation du climat du printemps en 2 situations opposées à "l'année moyenne" (pluie et peu d'aléas ou au contraire peu de pluie et aléas) permet de tenir compte de la variabilité interannuelle de production et de valeur nutritive. Par exemple, une année avec des chutes de neige après le 1^{er} mai, la valeur nutritive des fourrages est plus faible, d'environ -3% de DMO, à la floraison du dactyle.

Ces informations sont organisées sous forme d'une typologie de la valeur d'usage agricole (JEANNIN et al., 1991 ; ROUMET et FLEURY, 1994). Celle-ci contient en particulier une fiche par type de prairie présentant ses caractéristiques agronomiques : évolution saisonnière et variabilité interannuelle de la production de matière sèche et de la

valeur nutritive, récoltabilité et appétibilité des fourrages, pratiques et conditions de milieu ayant déterminé ce type et possibilités d'évolution par changement des pratiques.

Conclusion

Les résultats de ce travail nous permettent de répondre aux interrogations des agriculteurs de haute-Maurienne en matière de conduite des prairies permanentes. Nous avons vu qu'une fauche précoce, avec une production de 1^{er} cycle plus faible, n'est pas compensée par une repousse de 2^e cycle plus importante (tableau 5). D'autre part, les printemps peu arrosés, la croissance s'arrête à la pleine épiaison du dactyle dans les prairies un peu sèches (figure 1b). Cet arrêt précoce de la croissance est impossible à prévoir, des pluies pouvant toujours survenir en fin de printemps et permettre un redémarrage. Dans cette situation, **décider d'une fauche précoce, assurant une certaine qualité de fourrage comporte donc le risque de pénaliser la quantité récoltée.** Ceci n'est pas accepté dans les exploitations cherchant à produire un stock important de foin. Au contraire, **ces exploitants préfèrent une prise de risque sur la qualité du fourrage.** Ils ne fauchent pas, même avec une sécheresse installée et attendent en espérant une reprise de la croissance. Les agriculteurs intègrent donc dans leurs logiques d'utilisation des prairies les conditions particulières de pousse de l'herbe de Haute-Maurienne.

Cette gestion du risque, mais aussi certaines pratiques comme la fauche de prairies éloignées seulement les années peu productives afin de compléter la récolte de foin, montrent que **l'adaptation des stocks hivernaux aux besoins relève autant de l'organisation des systèmes fourragers que de la conduite des prairies.** C'est un problème qui ne peut pas se résoudre seulement par l'intensification des prairies permanentes, en particulier par le recours systématique à la technique de la fauche précoce, même adaptée aux conditions climatiques de la zone. C'est pourquoi, plutôt que de fournir une réponse technique unique, nous avons choisi de proposer des informations exhaustives sur les différents types de prairie (ROUMET et FLEURY, 1994). Celles-ci sont une base pour aider à raisonner des améliorations techniques adaptées aux différentes prairies tout en tenant compte des objectifs et des contraintes de l'exploitation ou encore d'objectifs environnementaux (diversité biologique, aspects visuels...). En effet, nous sommes dans un secteur à enjeux du fait d'une fréquentation touristique importante et de la proximité du parc national de la Vanoise.

Enfin, à l'issue de ce travail, **bien des interrogations sur les mécanismes de la croissance à l'échelle du couvert subsistent.** Certes, les retombées pratiques des recherches sur la morphogenèse, la production et la valeur nutritive des plantes prairiales en haute altitude ne peuvent être que limitées compte tenu des faibles surfaces concernées, en France tout au moins. Ces études auraient pourtant un intérêt de portée générale dans la mesure où elles seraient l'occasion idéale d'enrichissements mutuels entre les concepts et les modèles de l'écophysiologie appliquée à l'agronomie (LEMAIRE, 1991) et ceux des écologues s'intéressant aux diverses influences des conditions extrêmes de haute altitude sur les végétaux (OZENDA, 1985).

Accepté pour publication, le 26 décembre 1995.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Programme de Recherche Développement du GIS Alpes du Nord. Elle a été financée par le GIDA Haute-Maurienne, le Conseil Régional Rhône-Alpes et la CEE (projet CAMAR CT 910304).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C., SAUVANT D. (1988) : "Tableau de la valeur nutritive des aliments", *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, I.N.R.A. Ed., Paris, 351-471.
- AUFRÈRE J. (1982) : "Etude de la prévision de la digestibilité des fourrages par une méthode enzymatique", *Ann. Zootech.*, I.N.R.A., 31, 111-130.
- DAMBRINE E., DORIOZ J.M., FLEURY P. (1984) : *Haute-Maurienne : première typologie des prairies de fauche, zonation du milieu physique*, G.I.S. Alpes du nord, Chambéry, doc mult., 11p.
- DEINUM B., (1984) : "Chemical composition and nutritive value of herbage in relation to climate", *Proc. 10th Gen. Meet. Eur. Grassl. Fed.*, Norvège, 338-350.
- DORIOZ J.M., TREVISAN D. (1992) : *Couverture pédologique et surfaces fourragères de montagne*, I.N.R.A. Science du dol, GIS Alpes du Nord, 11 rue Métropole, F-73000 Chambéry, 10 fiches.
- DURU M. (1989) : "Dynamique de tallage et types de talles au printemps. Cas du dactyle de prairies permanentes", *Fourrages*, 117, 17-28.
- DURU M. (1992a) : "Bases agronomiques pour gérer les ressources fourragères selon différents objectifs de production et d'utilisation", *L'extensification en production fourragère*, *Fourrages*, n°spécial, 77-87.
- DURU M. (1992b) : "Diagnostic de la nutrition minérale de prairies permanentes au printemps. I. Etablissement de références", *Agronomie*, 12, 219-233.
- FLEURY Ph. (1994) : *Le diagnostic agronomique des végétations prairiales et son utilisation dans la gestion des exploitations agricoles. Typologies fondées sur les aptitudes des prairies à remplir des fonctions. Méthode et applications dans les Alpes du Nord*, thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, sciences agronomiques, 139 pages +annexes.
- GOSSE G., CHARTIER M., LEMAIRE G. (1984) : "Mise au point d'un modèle de prévision de production pour une culture de luzerne", *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 298, série III, 541-544.
- JEANNIN B., FLEURY PH., DORIOZ J.M. (1991) : "Typologie régionale des prairies permanentes fondée sur leur aptitude à remplir des fonctions", *Fourrages*, 128, 377-422.
- LEMAIRE G. (1985) : *Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée pendant l'hiver et le printemps. Effets des facteurs climatiques*, thèse de Doctorat d'état, Université de Caen, 96p.
- LEMAIRE G. (1991) : "Productivité des peuplements prairiaux : caractérisation et diagnostic", *Fourrages*, 127, 259-272.
- LEMAIRE G., DURAND J.L., LILA M. (1989a) : "Effet de la sécheresse sur la digestibilité in vitro, la teneur en ADF et la teneur en azote de la luzerne (*Medicago sativa* L.)", *Agronomie*, 9, 841-848.

- LEMAIRE G., GASTAL F., SALETTE J. (1989b) : "Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content", *XVth Int. Grassl. Cong.*, Nice, France, 1, 179-180.
- LEMAIRE G., ALLIRAND J.M. (1993) : "Relation entre croissance et qualité de la luzerne : interaction génotype-mode d'exploitation", *Fourrages*, 134, 183-198.
- OZENDA P. (1985) : *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen*, Masson Ed., Paris, 330p.
- RICHARD L., TONNEL A. (1987) : "Contribution à l'étude des vallées internes des Alpes occidentales. Première partie : originalité du milieu et quelques conséquences biologiques", *Doc. Cart. Ecol.*, Grenoble, Vol. XXX, 113-136.
- ROUMET J.P., FLEURY Ph. (1994) : *Typologie des prairies de fauche des vallées internes des Alpes du Nord. Fiches techniques et document technique*, S.U.A.C.I. Montagne, I.N.R.A. Systèmes Agraires et Développement Versailles, document technique du G.I.S. Alpes du Nord, 94-05, 16 fiches + 30 pages.
- SNAYDON R.W. (1972) : "The effect of total water supply, and of frequency of irrigation, upon lucerne. II Chemical composition", *Aust. J; Agric. Res.*, 23, 253-256.
- TOMASSONE R., LESQUOY E., MILLIER C. (1983) : *La régression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*, Collection I.N.R.A. actualités scientifiques et agronomiques, 13, Masson Ed., Paris, 180 pages.
- TROXLER J. (1989) : *Valeur agronomique et qualité de quelques dicotylédones*, Communication au VI^{ème} colloque du sous-réseau F.A.O. des herbages de montagne, Cracovie, Pologne, doc. mult., 25 pages.

SUMMARY

Factors of variation and forecast of the forage production in upper mountains

In the extreme environmental conditions and agricultural practices prevalent in the inner valleys of the northern Alps (cold and dry climate), it is difficult to apply the techniques usually advised for the improvement of permanent pastures (particularly early cuts), and advisory work presupposes a better knowledge of the productivity and nutritional value of the pastures. As compared to less cold and rainier areas of the Alps, the conditions of the inner Alps entail, for the same application of fertilizers, morphological changes in the plants (a smaller proportion of stems) which affect favourably the nutritional value.

The paper deals next with the factors affecting dry matter productivity and the nutritional value of hay-meadows in the valleys of the inner Alps. The results show that the factors affecting growth negatively (dearth of available nutrients and of water, low temperatures) exert a positive influence on digestibility and protein content, whereas climatic stresses (snow, hot weather) act unfavourably. These factors operate in a complex way, and as a result there is a strong variation of dry matter yields and nutritional values among years. Lastly, in spite of the large number of factors involved and the existence of still unexplained mechanisms, it was possible to propose some simple indicators that can be used for a rapid field diagnosis.